DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151318

不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放日变化研究*

宋 敏[1,2,3,4] 蔡立群[1,2,3**] 齐 鹏[1,2,3] Stephen Yeboah[1,2,3,5]
张仁陟[1,2,3] 罗珠珠[1,2,3] 潘占东[1,2,3] 卢廷超[1]

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070; 3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心 兰州 730070; 4. 安徽职业技术学院纺织服装学院 合肥 230514; 5. CSIR-Crops Research Institute, P.O. BOX 3780-Kumasi, Ghana)

摘 要 在陇中黄土高原干旱半干旱区，采用小区定位试验，对不同生物质炭水平(0 t·hm^{-2}、10 t·hm^{-2}、20 t·hm^{-2}、30 t·hm^{-2}、40 t·hm^{-2}、50 t·hm^{-2})下农田土壤温室气体(CO_2、N_2O 和 CH_4)的日排放通量及其影响因子进行连续观测，并确定1 d中不同生物质炭处理水平下的最佳观测时间。结果表明：6个生物质炭输入水平处理下，春小麦地土壤 CH_4、N_2O 和 CO_2 通量变化趋势与气温日变化轨迹大体一致，均表现为白天排放量大于夜间，并在4:00—5:00时，出现对 CH_4 通量的吸收峰，以及 N_2O 与 CO_2 的排放低谷；全天内各处理 CH_4 平均排放通量依次为：10.14 μg·m^{-2}·h^{-1}、7.82 μg·m^{-2}·h^{-1}、6.57 μg·m^{-2}·h^{-1}、−0.10 μg·m^{-2}·h^{-1}、1.05 μg·m^{-2}·h^{-1} 和 2.89 μg·m^{-2}·h^{-1}，N_2O 平均排放通量依次为：288.79 μg·m^{-2}·h^{-1}、201.78 μg·m^{-2}·h^{-1}、157.14 μg·m^{-2}·h^{-1}、112.06 μg·m^{-2}·h^{-1}、154.60 μg·m^{-2}·h^{-1} 和 164.02 μg·m^{-2}·h^{-1}，CO_2 平均排放通量依次为：85.44 mg·m^{-2}·h^{-1}、80.91 mg·m^{-2}·h^{-1}、76.49 mg·m^{-2}·h^{-1}、65.29 mg·m^{-2}·h^{-1}、67.19 mg·m^{-2}·h^{-1} 和 69.10 mg·m^{-2}·h^{-1}；当生物质炭输入量小于30 t·hm^{-2}时，土壤 CH_4、N_2O、CO_2 排放通量随其输入量增加而显著减小，但当其输入量超过30 t·hm^{-2}时，3种温室气体排放通量则呈显著增大趋势；当生物质炭输入水平为30 t·hm^{-2}时，春小麦土壤全天表现为 CH_4 的吸收汇，其余各水平处理下的土壤表现为 CH_4 的弱排放源；6种处理水平下，全天春小麦地土壤表现为 N_2O、CO_2 的排放源。0~5 cm的土壤温度及水分(y)与生物质炭输入量(x)回归方程分别为 y=−0.017 6x+16.585 (R^2=0.302 6, r=−0.55, P<0.05)和 y=0.056 5x+13.626 (R^2=0.815 1, r=0.903, P<0.05)，生物质炭输入量与0~5 cm的土壤水分呈显著正相关关系；无生物质炭输入处理下3种温室气体的吸收或排放通量与地表温度及5 cm地温均呈显著正相关关系，其他各处理也表现出不同程度的正相关关系。因此，当生物质炭输入水平为30 t·hm^{-2}时，更有利于 CH_4、N_2O 和 CO_2 3种温室气体的增汇减排；生物质输入水平差异引起的土壤温度及水分差异可能是不同生物质炭处理 CH_4、N_2O 和 CO_2 日排放通量产生差异的主要原因；由矫正系数及最佳时段温室气体排放量与累积排放量回归分析可得，3种温室气体的最佳同期观测时间为8:00—9:00。

关键词 旱作农田 春小麦 生物质炭 温室气体 排放通量 日变化 土壤温度 土壤水分
中图分类号: X171.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)10-1300-10

Diurnal variations of greenhouse gases emissions under different biochar applications*

SONG Min[1,2,3,4], CAI Liqun[1,2,3**], QI Peng[1,2,3], Stephen Yeboah[1,2,3,5], ZHANG Renzhi[1,2,3],

* 甘肃省干旱生境作物学重点实验室开放基金课题(GSCS-2012-13)、国家自然科学基金项目(31160269, 31571594)、“十二·五”《循环农业科技工程》项目(2012BAD14B03)和甘肃省自然科学基金项目(145RJZA204,145RJZA106)资助
** 通讯作者：蔡立群，研究方向为农业生态学。E-mail: cailq@gsau.edu.cn
宋敏，研究方向为恢复生态学、生态环境效应。E-mail: 153405328@qq.com
收稿日期: 2015−12−15 接受日期: 2016−04−06

* Supported by the Open Found of Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science Project (GSCS-2012-13), the National Natural Science Foundation of China (31160269, 31571594), the Project of the Twelfth Five-Year Plan for Circular Agriculture Science and Technology (2012BAD14B03) and the Natural Science Foundation of Gansu Province (145RJZA204,145RJZA106)
** Corresponding author, E-mail: cailq@gsau.edu.cn
Received Dec. 15, 2015; accepted Apr. 6, 2016

LUO Zhuzhu[1,2,3], PAN Zhandong[1,2,3], LU Tingchao[1]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Province Research Center for Water-saving Agriculture Engineering Technology, Lanzhou 730070, China; 4. Department of Textile Engineering, Anhui Vocational and Technical College, Hefei 230514, China; 5. CSIR-Crops Research Institute, P.O. BOX 3780-Kumasi, Ghana)

Abstract　Biochar is a carbon-rich solid product obtained from heating biomass under oxygen-limited conditions. Biochar application has the potential to mitigate greenhouse gas emission. Dryland farming areas in Northwest China emit substantial amounts of greenhouse gases. The aim of this study was to determine the effects of different biochar rates on diurnal variations in methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O) and carbon dioxide (CO_2) emissions in the western Loess Plateau. Treatments included 6 biochar application rates (3 replications): 0 t·hm^{-2} (control, B0), 10 t·hm^{-2} (B1), 20 t·hm^{-2} (B2), 30 t·hm^{-2} (B3), 40 t·hm^{-2} (B4) and 50 t·hm^{-2} (B5) t·hm^{-2}. Soil moisture and temperature were measured concurrently with gas measurement. The results showed distinct diurnal variations in CO_2, CH_4 and N_2O fluxes for different biochar application rates. The trends of change in the fluxes of the 3 gases (CH_4, N_2O and CO_2) were consistent with daily variations in temperature. Daytime fluxes were greater than nighttime fluxes. The order of absorption peak of CH_4 was B0 (10.14 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B1 (7.82 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B2 (6.57 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B5 (2.89 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B4 (1.05 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B3 (−0.10 μg·m^{-2}·h^{-1}). A similar order was noted for average emission flux of N_2O, given as B0 (288.79 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B1 (201.78 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B5 (164.02 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B2 (157.14 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B4 (154.60 μg·m^{-2}·h^{-1}) > B3 (112.06 μg·m^{-2}·h^{-1}). The order of average emission flux of CO_2 was B0 (85.44 mg·m^{-2}·h^{-1}) > B1 (80.91 mg·m^{-2}·h^{-1}) > B2 (76.49 mg·m^{-2}·h^{-1}) > B5 (69.10 mg·m^{-2}·h^{-1}) > B4 (67.19 mg·m^{-2}·h^{-1}) > B3 (65.29 mg·m^{-2}·h^{-1}). The results showed that when biochar input was less than 30 t·hm^{-2}, mean emission fluxes of CH_4, N_2O and CO_2 dropped with increasing biochar application rate. However, when biochar input exceed 30 t·hm^{-2}, the mean emission fluxes of CH_4, N_2O and CO_2 increased with increasing biochar application rate. The soil was a good source of atmospheric CH_4 for all treatments (except for 30 t·hm^{-2}) and sources of atmospheric N_2O and CO_2, irrespective of treatment. Soil temperature at 5 cm depth was correlated with biochar application rate — $y = -0.017\,6x + 16.585$ ($R^2 = 0.302\,6$, $r = -0.55$, $P < 0.05$), but soil moisture at 5 cm soil depth was linearly correlated with biochar application rate — $y = 0.056\,5x + 13.626$ (R^2=0.815 1, r = 0.903, $P < 0.05$). The average fluxes of CH_4, N_2O and CO_2 under the control treatment were positively correlated with soil temperature of both soil surface and the 0–5 cm depth. The others treatments were also positively correlated with different levels of biochar. Biochar application at 30 t·hm^{-2} reduced greenhouse gas emission. The differences in both soil temperature and moisture caused by different input levels of biochar were the main reasons for the differences in CH_4, N_2O and CO_2 emissions. Correction coefficient and regression analysis of optimal measure time revealed that the optimal observation period of the three greenhouse gases was between 8 a.m. and 9 a.m.

Keywords　Dry farmland; Spring wheat; Biochar; Greenhouse gases; Emission flux; Diurnal variation; Soil temperature; Soil moisture

CH_4、N_2O、CO_2 是引起全球气候变化的主要温室气体，农田土壤是温室气体的重要排放源[1−2]，农业活动产生的温室气体各占大气中 CH_4、N_2O 和 CO_2 的 90%、70%和 20%[2−3]，对温室气体总排放的贡献率大约为 20%[4]。随着全球变暖导致气候异常日益加剧，改良农田土壤性质，提高农田碳汇，减少农业源温室气体排放，对于缓解全球气候变化具有极其重要的意义。

生物质炭是在厌氧或无氧条件下，经高温热解(350~600 ℃)产生的一种多孔富碳、高度芳香化难溶性的固态物质，具有稳定性强、比表面积大、吸附能力强的特点[5]。生物质炭还田后，可将植物光合作用所固定的有机碳转化为惰性碳，提升稳定性碳库储量[6]，减缓微生物对有机碳的矿化，达到增汇减排的作用[5]。因此生物质炭在农业领域中的应用备受关注。高德才等[7]、Stewart 等[8]的研究发现，生物质炭添加能显著降低土壤 N_2O 排放，但土壤 CO_2 排放则随生物质炭输入量的增加而增加。柯跃进等[9]室内培养试验发现，耕地土壤中添加生物炭对土壤 CO_2 排放的减排率高达 41.5%。Spokas 等[10]通过不同生物质炭输入水平试验，发现生物质炭对土壤 CO_2 及 CH_4 的排放具有显著抑制效果，且不同输入水平均能在一定程度上抑制土壤 N_2O 的排放。郭艳亮等[11]通过在半干旱区农田的研究发现，短期内生物炭的添加对土壤 CO_2 和 N_2O 排放没有显著影响，但 CH_4 排放随着生物炭添加量的增加而降低。Zhang 等[12]旱地试验发现，与对照相比，不同生物质炭输入量处理下的 CH_4 排放量均未出现明显变化。我们的研究发现，作物生长季土壤 CH_4 排放通量随生物质炭输入量的增加而减小；当生物质炭输入量小于

30 t·hm^{-2} 时，土壤 N_2O、CO_2 排放通量随其输入量增加而显著减小，但当其输入量超过 30 t·hm^{-2} 时，N_2O、CO_2 排放通量则呈显著增大趋势[13]。可见，目前国内外有关生物质炭输入水平对温室气体增汇减排的研究结论尚不统一，且以大时间尺度研究为主，在此基础上的日变化差异研究少见报道。温室气体日排放研究是估算大时间尺度(如年际和季节)下温室气体排放量的基础[14−15]。因此，探究不同生物质炭水平下的温室气体日排放规律并确定其最佳观测时间，对于研究生物质炭输入水平对温室气体的影响，精准估算不同生物质炭水平下的温室气体排放具有重要意义。

本研究在黄土高原半干旱区，通过研究不同生物质炭输入水平下，全天旱作农田温室气体连续排放特征及温度对 CH_4、N_2O 和 CO_2 气体通量的影响，在时间尺度上探讨生物质炭输入水平差异可能导致的土壤温室气体排放差异，以期为生物质炭处理下的旱作农田温室气体观测确定最佳时间，科学估计生物质炭对农田温室气体的减排效益，为合理应用生物质炭、减少温室气体排放、缓解全球气候变暖提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地设在甘肃省定西市安定区李家堡镇甘肃农业大学旱作农业综合试验站，该区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区，为典型的雨养旱作农业区。区内平均海拔 2 000 m 左右，日照时数 2 300 h，年平均太阳辐射 5 94.9 kJ·cm^{-2}，年均气温 6.5 ℃，无霜期 149 d，年均降水量 390.99 mm，年蒸发量 1 531 mm，80%保证率的降水量为 365 mm，变异系数 24.3%，干燥度 2.53。土壤为典型的黄绵土，土质绵软，土层深厚，质地均匀，储水性能良好。土壤 pH 为 8.36，土壤平均容重为 1.17 g·cm^{-3}，凋萎含水率 7.3%，饱和含水率 21.9%，有机质含量 12.01 g·kg^{-1}，全氮 0.76 g·kg^{-1}，全磷(P_2O_5)1.77 g·kg^{-1}。

1.2 试验设计与方法

试验设置 6 个生物质炭水平处理，分别为 0 t·hm^{-2} (B0)、10 t·hm^{-2} (B1)、20 t·hm^{-2} (B2)、30 t·hm^{-2} (B3)、40 t·hm^{-2} (B4)和 50 t·hm^{-2} (B5)，3 次重复，试验小区面积为 2.8 m×6 m，小区采用完全随机区组设计，播前耕后按试验设计量均匀撒入土壤后翻埋于耕层土壤(10 cm 左右)。供试春小麦品种为'定西 35 号'，2015 年 3 月下旬播种，7 月底收获，播种量为 187.5 kg·hm^{-2}，行距为 20 cm，播深 7 cm。各处理施用氮素与磷肥水平一致，施纯 N 105 kg·hm^{-2}(尿素，46%N)，纯 P_2O_5 105 kg·hm^{-2}(过磷酸钙，含 14%的 P_2O_5)。在播种同时按照试验设计一次性施肥，不再追肥。

供试生物质炭为金和福农业科技股份有限公司生产的玉米秸秆生物质炭，生物炭基本性质：pH 9.21，C 含量 53.28%，N 含量 1.04%，P 含量 0.26%，Ca 含量 0.8%，K 含量 0.51%。

1.3 气体采集与样品分析

1.3.1 气体样品采集

CH_4 与 N_2O 采用静态暗箱密闭法收集气体样品[16]。根据试验地气候特征及春小麦生育期状况，结合以往季节性变化研究[17]，采样时间选取水肥、气候等外部环境因素相对稳定的 5 月中下旬进行，根据气象报告，日变化测定日期定为 5 月 22—23 日，观测日天气为晴转多云，为本月份代表性天气。采样时间从 16:00 开始，到次日 17:00 结束，每隔 4 h 取样 1 次。根据气象观测记录，气温、风力级别、地下 5 cm 土壤温度、空气湿度、土壤湿度等影响温室气体通量的环境要素大致为 5 月份的平均水平，可代表本月份总体情况。

采样箱为圆柱形，包括底座和顶箱，由 1 mm 厚 304 K 薄的不锈钢板制成，顶箱直径 38 cm，高 35 cm，底座内径 36.5 cm，高 16 cm，上端有密封凹槽，播种后将底座栽入各处理小区中间，整个采样期不再移动；箱体外围覆铝箔反光保温膜，顶部留有 1 个胶塞测温口，用于采样时插入温度计记录箱内温度；箱体内部装有风扇用于混匀气体；箱体一侧安装三通阀采样孔，用于注射器采样。采样时，将顶箱嵌入底座凹槽加水密封，插入温度计并接通风扇电源后立即用注射器分别采集 0 min、10 min 和 20 min 的气体样品，分别注入 150 mL 铝塑复合气袋中带回实验室进行分析。

CO_2 气体通量采用 EGM-4 便捷式 CO_2 分析仪(英国 PP Systems 公司生产)测定，与 N_2O、CH_4 气体样品采集同步进行。

1.3.2 气体样品分析

气体浓度采用安捷伦 7890A 型气相色谱仪进行分析。色谱柱：ParkQ 15 m×0.53 mm×25 μm。CH_4 采用前检测器 FID(检测温度 200 ℃，柱温 55 ℃)，载气为高纯 N_2；N_2O 采用后检测器(u)ECD(检测温度 300 ℃，柱温 45 ℃)，载气为高纯 N_2，气体排放通量 F 计算公式为：

$$F=\frac{C_2\times V\times M_0\times 273/T_2-C_1\times V\times M_0\times 273/T_1}{A\times(t_2-t_1)\times 22.4} \qquad (1)$$

式中：F 为气体排放通量(mg·m^{-2}·h^{-1})；A 为取样箱底

面积(m^2); V 为体积(m^3); M_0 为气体分子量; C_1、C_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温室气体的体积浓度($mol\cdot mol^{-1}$); T_1、T_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温度(K), t_1、t_2 为测定开始和结束的时间。

温室气体(CH_4、N_2O、CO_2)累积排放量(M)计算公式如下:

$$M=\sum\left(F_{N+1}+F_N\right)\times0.5\times\left(t_{N+1}-t_N\right)\times10^{-2} \quad (2)$$

式中: M 为全天气体累积排放量($kg\cdot hm^{-2}$), F 为气体排放速率($mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$), N 为采样次数, t 为相邻两次采样的时间间隔(h)。

不同生物质炭输入水平下旱作农田一天中各个时刻温室气体排放通量的矫正系数计算公式如下[14]:

$$C_i=\frac{F_{avg}}{F_i} \quad (3)$$

式中: i 为一天中进行观测的次数, 各次观测之间的时间相等; C_i 为矫正系数; F_{avg} 为温室气体日平均排放通量; F_i 为第 i 次观测的温室气体排放通量。

1.3.3　同期观测数据

土壤温度测定。试验小区各设地温计, 采样同时同步观察记录地表及地下 5 cm 处的土壤温度。

土壤水分含量测定。采集气体同时, 用土钻取 0~5 cm 土层土壤, 用烘干法[(105±2) ℃]进行土壤含水量测定。

1.4　数据整理与分析

试验原始数据用 Microsoft Office Excel 2010 整理后, 利用 Origin 9 与 SPSS 17.0 软件进行显著性和相关性分析作图。

2　结果与分析

2.1　不同生物质炭输入水平下春小麦田 CH_4、N_2O、CO_2 通量的日变化

由图 1a 可以看出, 不同生物质炭输入处理下, 春小麦田土壤 CH_4 通量与气温变化趋势大致一致, 具有明显的日变化特征, 各处理排放通量均表现为

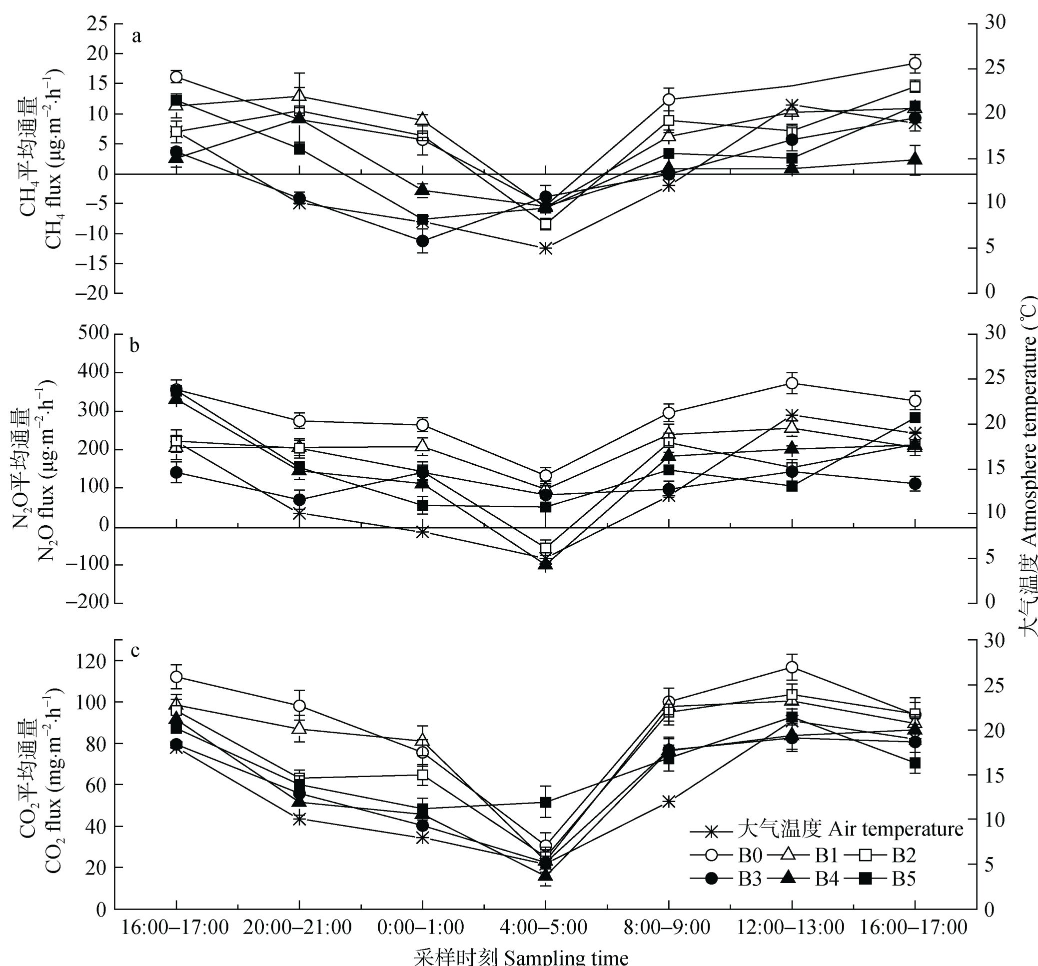


图 1　不同生物质炭输入水平下春小麦地土壤 CH_4(a)、N_2O(b)和 CO_2(c)排放通量日变化

Fig. 1　Diurnal variations of soil CH_4 (a), N_2O (b) and CO_2 (c) fluxes of spring wheat fields under different biochar application rates

B0: 0 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭; B1: 10 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭; B2: 20 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭; B3: 30 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭; B4: 40 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭; B5: 50 $t\cdot hm^{-2}$ 生物质炭。下同。B0: 0 $t\cdot hm^{-2}$ biochar application; B1: 10 $t\cdot hm^{-2}$ biochar application; B2: 20 $t\cdot hm^{-2}$ biochar application; B3: 30 $t\cdot hm^{-2}$ biochar application; B4: 40 $t\cdot hm^{-2}$ biochar application; B5: 50 $t\cdot hm^{-2}$ biochar application. The same below.

白天排放量大于夜间。在 16:00—4:00，各处理排放通量大致呈逐渐降低趋势，在 4:00—5:00 达到全天的吸收峰，其中 B3 吸收通量最低，达–3.86 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$，分别比 B0、B1、B2、B4 和 B5 低 28.44%、31.82%、54.40%、29.38%和 33.25%，各处理间吸收通量差异较小。随后 CH_4 的排放通量开始上升，进入白天，各处理排放通量差异显著增大，16:00—17:00 达到白天的排放峰，B0 显著高于其他各处理。白天各处理表现为 CH_4 的净排放源，4:00—5:00 各处理表现为净吸收汇。

由图 1b 可知，不同生物质炭处理水平下 N_2O 排放通量日变化特征明显，B3 变化平缓，B0 的 N_2O 排放通量明显高于其他各处理，各处理随昼夜温差变化呈昼高夜低的变化趋势。16:00—4:00 随温度的降低，各处理 N_2O 排放通量逐渐降低。5:00 以后各处理 N_2O 排放通量开始上升，在 12:00—13:00，除 B2、B4、B5 外，其余处理出现 N_2O 排放峰。B0 处理在各时段排放通量保持较高水平，并在 4:00—5:00 出现排放低谷，12:00—13:00 达到一天的峰值，排放通量波动范围为 131.81~372.67 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$，说明气温变化对 B0 处理排放通量影响较大。B3 在各时段排放通量变化较小，说明 30 $t \cdot hm^{-2}$(B3)的生物质炭输入水平可能更利于抑制硝化和反硝化细菌的活性。

图 1c 为不同生物质炭输入水平下，春小麦地 CO_2 排放通量的日变化曲线。不同生物质炭输入水平下，土壤 CO_2 排放通量的日变化大致呈单谷单峰曲线，昼高夜低，其变化趋势与气温日变化轨迹大体一致，说明旱作农田温室气体排放受温度的影响较大，各处理 CO_2 排放通量随气温升高而升高，随温度降低而降低，白天排放通量显著高于夜晚。16:00—5:00 随气温下降，除 B5 最低排放通量出现在 0:00—1:00，其他处理在 4:00—5:00 出现对 CO_2 的排放谷。4:00—13:00 随气温回升，各处理排放通量逐渐增大，并在 12:00—13:00 出现对 CO_2 的排放峰，B0 处理此时达到全天的排放最高值，为 116.76 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$，分别比 B1、B2、B3、B4 和 B5 高 16.31%、12.61%、41.0%、39.19%和 25.85%，12:00—17:00 随温度下降排放通量再次表现出下降趋势。

2.2 不同生物质炭输入水平对春小麦地 CH_4、N_2O 和 CO_2 日平均通量的影响

表 1 为 CH_4、N_2O 和 CO_2 气体全天的通量差异。由于全天各时段的气体通量只能反映相应时段的排放或吸收状况，且环境因子变化差异亦有可能引起通量变化出现偏差，本文通过核算各处理全天气体平均通量，并进行方差分析和多重比较(表 2)，估算全天内各处理对 CH_4、N_2O 与 CO_2 气体的影响。

表 1 不同生物质炭输入水平下小麦地 CH_4、N_2O、CO_2 的通量日平均值及多重比较

Table 1 Duncan's multiple-range test for the means of soil CH_4, N_2O and CO_2 fluxes of different biochar application rates in spring wheat fields

处理 Treatment	CH_4 通量 CH_4 flux ($\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	N_2O 通量 N_2O flux ($\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	CO_2 通量 CO_2 flux ($mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
B0	10.14±0.15a	288.79±11.12a	85.44±0.46a
B1	7.82±0.05b	201.78±1.96b	80.91±2.04b
B2	6.57±0.55b	157.14±0.61c	76.49±2.01c
B3	–0.10±0.18d	112.06±1.87d	65.29±0.21e
B4	1.05±1.22d	154.60±3.81c	67.19±1.05e
B5	2.89±0.85c	164.02±4.68c	69.10±0.25d

不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

可以得出：除 B3 处理土壤 CH_4 日平均通量为吸收通量，其他处理日平均通量为排放通量。各处理日平均通量的大小次序为：B0>B1>B2>B5>B4>B3。B0 处理下的 CH_4 平均通量显著大于 B1、B2、B3、B4 和 B5 处理，分别高 2.32 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$、3.57 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$、10.24 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$、9.09 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 和 7.25 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$，说明生物质炭添加会不同程度地减小 CH_4 的日排放量，且以 30 $t \cdot hm^{-2}$ 的生物质炭输入量为界，CH_4 日平均排放通量随生物质炭输入水平提高表现出先降低后增加的趋势。其中，B1 与 B2 差异不显著，B3 与 B4 差异不显著，说明 CH_4 日排放通量会随生物质炭添加量的不同产生差异，低水平生物质炭输入量之间、中水平生物质炭输入量之间的减排效应差异不显著。B3、B4 与 B5 之间差异显著，说明中水平与高水平生物质炭输入水平的减排效应差异显著。

旱作春小麦地土壤 N_2O 日平均通量为排放通量，6 种处理下的 N_2O 排放通量表现出明显的规律性变化。由表 1 可知，各处理下 N_2O 日平均排放通量大小次序为：B0>B1>B5>B2>B4>B3。B0、B1 和 B3 与其他各处理差异显著，B2、B4 和 B5 之间差异不显著。与 B0 处理相比，B1、B2、B3、B4 和 B5 的 N_2O 排放通量分别降低 30.13%、45.59%、61.20%、46.47%和 43.21%，说明在生物质炭输入量小于 30 $t \cdot hm^{-2}$ 时，N_2O 排放通量随生物质炭输入量的增加而减小，当超过 30 $t \cdot hm^{-2}$ 时，N_2O 排放通量反而表现出增加趋势，但高水平生物质炭处理之间的排放通量增加幅度较小。张斌等[18]在旱地土壤温室气体排放的研究结果表明，当生物质炭添加量为 40 $t \cdot hm^{-2}$ 时，N_2O 减排效应较好，与本研究结果接近。

表 2 各处理气体通量日变化与地表温度和 5 cm 地温的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between gases fluxes and soil surface temperature, soil temperature of 5 cm depth in diurnal variation

温室气体 Greenhouse gases	处理 Treatment	地表气温 Soil surface temperature			5 cm 地温 Soil temperature of 5 cm depth		
		相关方程 Correlation equation	相关系数 R Coefficient of correlation	决定系数 R^2 Coefficient of determination	相关方程 Correlation equation	相关系数 R Coefficient of correlation	决定系数 R^2 Coefficient of determination
CH_4	B0	y=0.001 6x–0.016 8	0.862*	0.743 5	y=0.001 6x–0.016 2	0.842*	0.709 6
	B1	y=0.000 8x–0.006 6	0.592	0.350 1	y=0.000 7x–0.003 2	0.589	0.347 5
	B2	y=0.000 9x–0.009 6	0.579	0.335 6	y=0.000 7x–0.004 2	0.624	0.389 6
	B3	y=0.001 3x–0.022 3	0.824*	0.679 1	y=0.001 7x–0.025 8	0.862*	0.743 8
	B4	y=0.000 4x–0.006 3	0.413	0.170 2	y=0.000 4x–0.005 0	0.366	0.134 2
	B5	y=0.001 2x–0.018 4	0.725*	0.525 1	y=0.001 6x–0.022 4	0.793*	0.629 0
N_2O	B0	y=0.016 4x+0.009 7	0.899**	0.808 5	y=0.014 7x+0.042 7	0.793*	0.628 8
	B1	y=0.008 6x+0.055 5	0.744*	0.554 1	y=0.004 2x+0.131 6	0.476	0.217 9
	B2	y=0.014 2x–0.084 5	0.632	0.398 9	y=0.008 3x+0.022 0	0.570	0.325 1
	B3	y=0.003 2x+0.057 5	0.467	0.217 7	y=0.004 2x+0.047 9	0.496	0.246 5
	B4	y=0.023 5x–0.246 2	0.786*	0.617 7	y=0.022 8x–0.201 7	0.751*	0.564 0
	B5	y=0.014 3x–0.080 3	0.551	0.303 7	y=0.020 0x–0.162 9	0.678	0.460 1
CO_2	B0	y=0.036 1x–0.049 8	0.894*	0.746 0	y=0.027 8x+0.101 4	0.652	0.424 6
	B1	y=0.029 8x+0.014 0	0.768*	0.590 1	y=0.017 5x+0.229 5	0.578	0.333 6
	B2	y=0.036 7x–0.136 5	0.914**	0.834 9	y=0.021 7x+0.135 7	0.833*	0.693 4
	B3	y=0.032 1x–0.152 5	0.948**	0.898 5	y=0.037 4x–0.174 5	0.891**	0.794 3
	B4	y=0.036 3x–0.211 7	0.913**	0.832 8	y=0.035 7x–0.149 6	0.882**	0.778 7
	B5	y=0.023 2x+0.039 6	0.958**	0.917 4	y=0.021 7x+0.081 3	0.788*	0.621 2

*和**分别表示在 0.05 水平和 0.01 水平(双侧)显著相关。* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels (2-tailed), respectively.

与 CH_4 和 N_2O 类似, 旱作春小麦地土壤 CO_2 的日平均通量为排放通量, 随生物质炭输入水平的差异表现出明显的规律, 各处理下的 CO_2 日平均排放通量的大小次序为: B0>B1>B2>B5>B4>B3。由表 1 可见, 除 B3 与 B4 之间差异不显著外, 其他各处理间 CO_2 排放通量差异显著。与 B0 处理相比较, B1、B2、B3、B4 和 B5 的 CO_2 排放通量分别降低 5.30%、10.48%、23.59%、21.36%和 19.12%, 说明当生物质炭输入水平为 30 t·hm^{-2} 时, CO_2 的减排效果最好, 当输入量过高时反而不利于 CO_2 的减排。

2.3 不同生物质炭输入水平下春小麦地 CH_4、N_2O 和 CO_2 通量日变化与地表气温、5 cm 地温的关系

由图 2 知, 各时段不同生物质炭输入水平下地表温度及 5 cm 地温日变化特征明显, 且变化趋势基本一致, 但变化幅度存在差异。

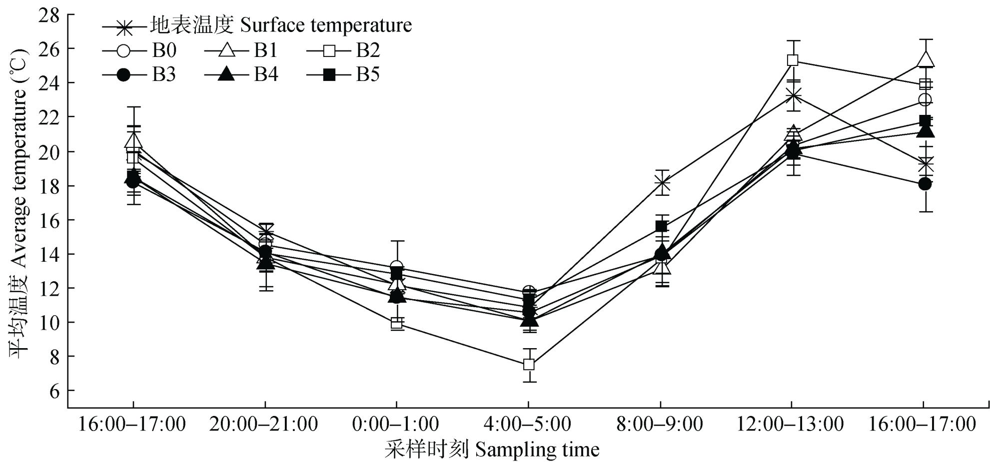


图 2 不同生物质炭水平下全天小麦地平均土壤温度变化图

Fig. 2 Variations of average soil temperature of different biochar application rates in spring wheat fields

由表 2 可知，CH_4 通量与地表温度及 5 cm 的地温呈正相关关系，其中 B0、B3、B5 处理相关性较显著，说明 CH_4 日排放通量随地表温度及 5 cm 地温的升高而升高，生物质炭输入水平不同导致的水热组合不同可能会引起 CH_4 排放通量的差异。

B0 和 B4 处理的 N_2O 排放通量与地表温度及 5 cm 地温呈显著正相关关系，B1 处理的 N_2O 排放通量与地表温度呈显著性正相关关系，其他处理的 N_2O 排放通量与地表温度及 5 cm 地温呈正相关但不显著，说明 N_2O 日排放通量随地表温度及 5 cm 地温的升高而升高，生物质炭的添加对 5 cm 地温具有一定的维持作用，且与 B0 处理相比较，其他处理 5 cm 地温变化差异对 N_2O 排放通量影响不大。

B0 和 B1 处理的 CO_2 排放通量与地表温度呈显著性正相关，其他处理的 CO_2 排放通量与地表温度呈极显著相关关系，说明地表温度的变化是影响 CO_2 排放通量的重要因素。B2 和 B5 的 CO_2 排放通量与 5 cm 地温呈显著性正相关，B3 和 B4 的 CO_2 排放通量与 5 cm 地温呈极显著性正相关，B0、B1 的 CO_2 排放通量与 5 cm 地温呈不显著正相关关系，说明生物质炭的添加会引起 5 cm 地温的变化，是导致 CO_2 排放通量变化的重要影响因子。由此可见，温度是造成不同生物质炭处理 CH_4、N_2O 和 CO_2 通量日变化差异的重要原因。

2.4 不同生物质炭输入水平下春小麦地 CH_4、N_2O 和 CO_2 通量排放的最佳观测时间及回归分析

由图 1 可见，温室气体的排放通量日变化特征明显，且存在较大的时间变异性。图 3 为 3 种温室气体的矫正系数随时间变化的分布图，矫正系数是指各时段温室气体的平均排放通量与某时段温室气体排放通量的比值，即某一时段排放通量矫正系数越接近于 1，该时段的排放通量就越接近于日平均排放通量。由图 3 可得，CH_4、N_2O、CO_2 3 种温室气体排放通量的矫正系数，均在 8:00—9:00 时较为接近于 1，说明 8:00—9:00 是 3 种温室气体同期观测的最佳时间，可以作为后续研究中的代表性观测时间，科学估计温室气体在相应季节的排放通量。

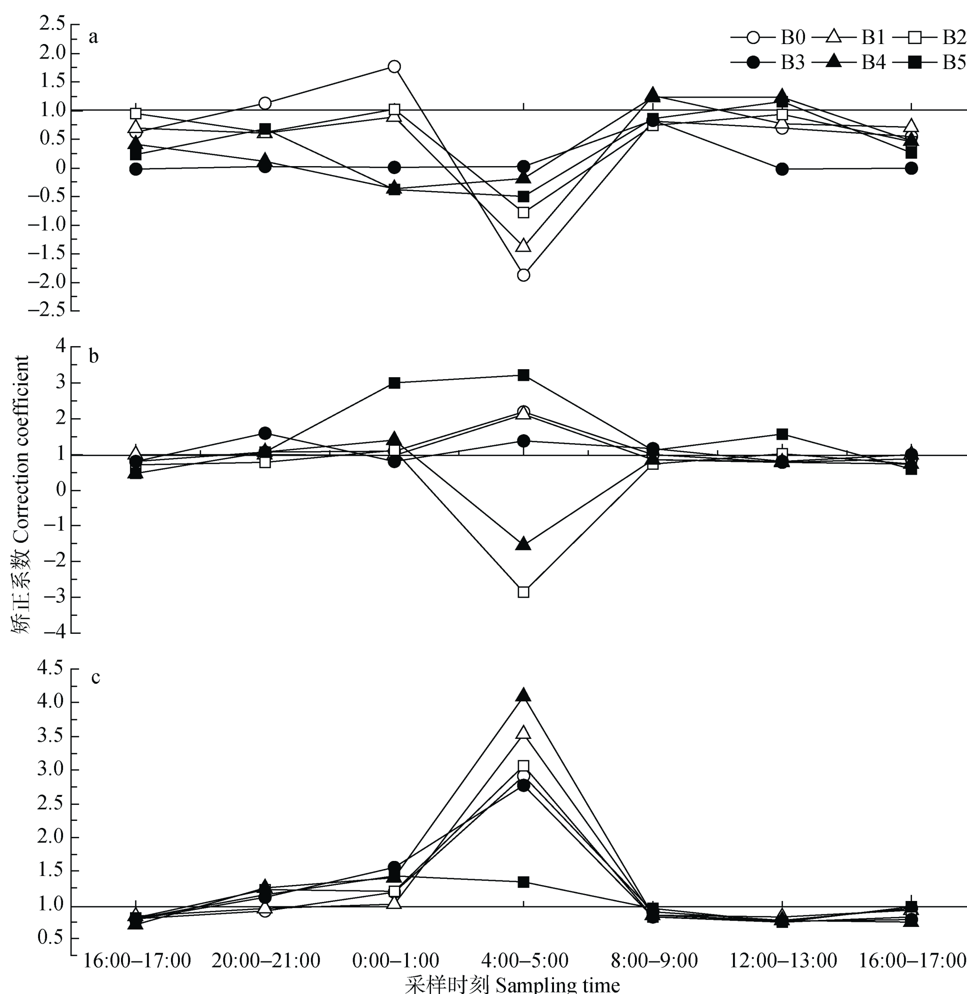


图 3 CH_4 (a)、N_2O (b)与 CO_2 (c)的矫正系数随时间分布图

Fig. 3 Diurnal variations of correction coefficients of CH_4 (a), N_2O (b) and CO_2 (c)

同时，通过对最佳时段的平均排放通量与日排放总量进行回归分析(图 4)，对最佳时段的代表性做进一步验证，结果表明，CH_4、N_2O 和 CO_2 在这一时间段的平均排放量与日排放总量的相关系数分别达 0.937 (P<0.01)、0.902(P<0.05)和 0.909(P<0.05)，均达显著水平，说明不同处理水平下，各气体这一时间段的排放量均具有很强的代表性，可作为生物质炭处理条件下，旱作农田春小麦田温室气体研究的最佳取样时间段。

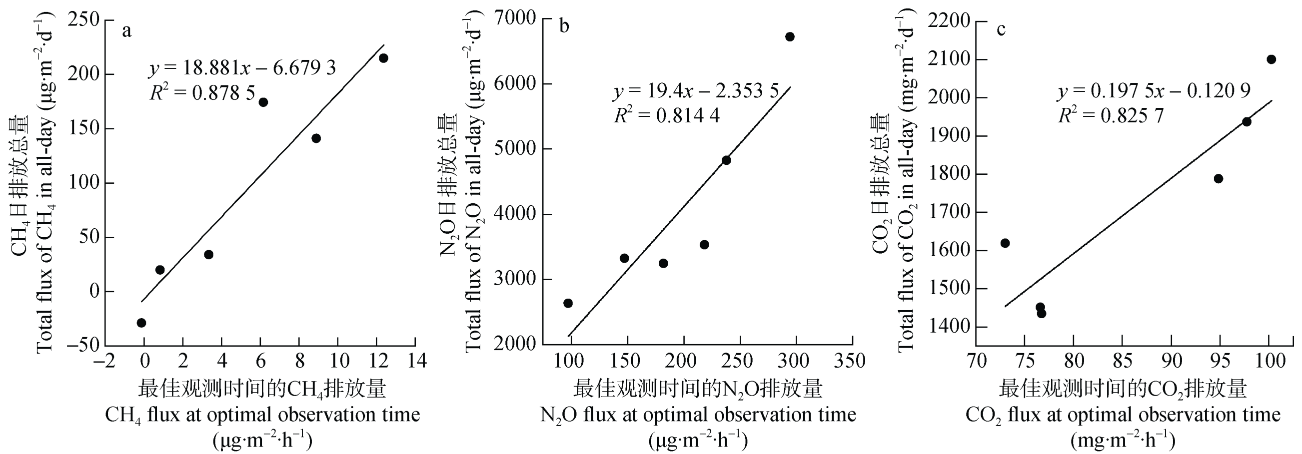


图 4　CH_4 (a)、N_2O (b)与 CO_2 (c)气体最佳观测时间排放通量与日排放总量的回归分析

Fig. 4　Regression analysis between the optimal observation time and the daily total fluxes of CH_4 (a), N_2O (b) and CO_2 (c)

3　讨论与结论

通过对不同生物质炭输入水平下土壤温室气体的日变化观测分析，本研究结果显示：在生物质炭输入水平小于 30 t·hm^{-2} 时，CH_4 排放通量表现为随生物质炭输入水平的增加而减小，当超过 30 t·hm^{-2} 时，CH_4 排放通量则表现出随生物质炭输入水平的增加而增加的趋势，原因可能是生物质炭输入土壤后，其巨大的比表面积和孔隙度改善了土壤的通气状况[19]，通过影响土壤供氧状况对 CH_4 产生和吸收过程中相关微生物的调节作用从而减少 CH_4 的排放[20]。与此同时，通过改变土壤水热状况，抑制产甲烷菌的活性，使得受温度变化影响较小的甲烷氧化菌活性增加，引起 CH_4 的排放减少[10,20]，但旱作农田土壤甲烷氧化菌活性有限，导致过量的生物质炭输入水平下的减排效应不显著。白天，旱作农田春小麦地为 CH_4 排放通量的源，夜间各水平处理 CH_4 通量既有源又有汇，4:00—5:00 时各处理表现为 CH_4 通量的净吸收汇。16:00—17:00 出现 CH_4 排放峰，这可能是经过一天的太阳辐射，土壤温度达到一天中的最高值，随温度上升，产甲烷菌较甲烷氧化菌活跃度高的缘故。16:00—17:00 时，与 B0 处理相比，其他各处理的 CH_4 排放通量较低，这可能是具有多孔特性的生物质炭将土壤水分吸附，使土壤透气性提高，水热状况较为稳定，一定程度上提高了甲烷氧化菌的氧化作用所导致的[10]。

大量研究表明，生物质炭的添加对 N_2O 的增汇减排具有积极的作用[10,18,21]。本研究结果显示，除 4:00—5:00 时段 B2 和 B4 出现对 N_2O 的吸收峰，各处理在各观测时段表现为 N_2O 的排放通量，且较 B0 处理，不同水平生物质炭的添加不同程度减少了 N_2O 的排放，说明旱作农田春小麦地为 N_2O 通量的排放源，这与刘博等[16]、段翠青等[22]的日变化研究结果以及王旭燕等[23]的季节特征研究结果一致，进一步说明了生物质炭的添加有利于旱作农田春小麦农田 N_2O 的增汇减排；当生物质炭输入水平为 30 t·hm^{-2} 时，生物质炭对农田 N_2O 的减排效应最好。这可能因为生物质炭添加后，增加了土壤的通气性[10]，提高了土壤阳离子交换量，吸附固定了土壤的 NH_4^+[24]，使反硝化作用的底物减少，抑制了硝化过程的进行，从而减少了 N_2O 的产生；也有可能是因为土壤 O_2 的增加，减少了硝化过程第 2 阶段以及反硝化过程中 N_2O 的产生[19]。但是，在反硝化过程中，N_2O 还原酶(Nos)对 O_2 的敏感度较其他酶要高得多，当生物质炭输入量过高时，通氧量的增加可能造成反硝化过程进行到 N_2O 时停止，引发 N_2O 排放增加[25]，这可能是 B4、B5 较 B3 减排效果减弱的原因。

国内外关于生物质炭对旱地 CO_2 排放影响的研究结果仍不尽一致，尚未形成系统结论，这可能是由于生物质炭来源、制备过程以及土壤差异等因素所导致[11,26–27]。本研究结果表明，较 B0 处理，在春小麦旱作农田添加生物质炭有利于 CO_2 的增汇减排，这一结果与 Liu 等[28]和 Spokas 等[10]的结论一致。原

因可能是生物质炭在土壤中的添加，一方面因其本身具有的高度稳定性，使其所含有的碳素牢牢固定在土壤中，成了碳的净汇，减少了碳循环中 CO_2 的排放量；另一方面，生物质炭较大的表面积和强吸附能力可将土壤有机质吸附到其表面或孔隙中，通过吸附作用降低有机质有效性，通过包封作用将微生物与有机质隔离，从而抑制有机质降解，减少 CO_2 的排放[26]。但 CO_2 的日排放量并非随生物质炭输入量的增加而减小，当生物质炭输入达到 30 $t{\cdot}hm^{-2}$ 时，旱作春小麦地土壤表现出对 CO_2 的最大减排比，这可能是土壤初始有机质含量对土壤呼吸作用的影响所导，生物质炭的添加降低了有机碳含量较低的黄绵土土壤呼吸，使 CO_2 排放量减小；但是过量的生物质炭，反而使 CO_2 排放量趋于增加，这可能是由于土壤有机碳库已经达到饱和状态[29]，过量的生物质炭输入土壤后所形成的土壤水热状况、土壤结构不利于 CO_2 的增汇减排。

由此可见，当生物质炭输入水平为 30 $t{\cdot}hm^{-2}$ 时，CH_4 的日平均通量为吸收通量，低于或高于 30 $t{\cdot}hm^{-2}$ 的各水平处理下，全天春小麦地土壤表现为 CH_4 的排放通量。6 种处理水平下，全天春小麦地土壤表现为 N_2O、CO_2 的排放源。当生物质炭输入水平为 30 $t{\cdot}hm^{-2}$ 时，更有利于 CH_4、N_2O 和 CO_2 气体日排放通量的增汇减排。

土壤温室气体的排放与环境因子息息相关。观测当天 0~5 cm 的土壤温度及水分与生物质炭输入量回归方程均达显著水平，由此可见生物质炭输入量与 0~5 cm 的土壤水分呈显著正相关，输入水平差异也在一定程度上引起土壤温度和水分的差异，生物质炭的添加对于土壤的水热状况有着重要的影响，势必会对温室气体排放造成影响。本研究结果表明，B0 处理 3 种温室气体(CH_4、N_2O、CO_2)的吸收或排放通量与地表温度及 5 cm 地温均呈显著正相关，说明在日变化中，CH_4、N_2O 和 CO_2 吸收或排放过程受地表温度及 5 cm 地温的显著影响，这与田慎重等[14]和谢军飞等[30]的研究结果一致。此外，其他各处理也表现出与地表温度及 5 cm 地温不同程度的正相关关系，说明在较短的时间尺度内，在气候、土壤、植物等状况相对稳定的情况下，温度成为影响温室气体排放的主要因素，在不同生物质炭输入水平下所形成的水热组合可能是导致各处理日排放通量差异的主要原因。

由矫正系数随时间的分布情况及排放总量与最佳时间的排放通量的回归分析可见，8:00—9:00 是 CH_4、N_2O 和 CO_2 的最佳观测时间，可作为旱作农田春小麦地 3 种温室气体观测时间，这与田慎重等[14]的研究结果一致。

参考文献 References

[1] 汪婧，蔡立群，张仁陟，等. 耕作措施对温带半干旱地区土壤温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1295–1300
Wang J, Cai L Q, Zhang R Z, et al. Effect of tillage pattern on soil greenhouse gases (CO_2, CH_4 and N_2O) fluxes in semi-arid temperate regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1295–1300

[2] 张玉铭，胡春胜，张佳宝，等. 农田土壤主要温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966–975
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2, CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966–975

[3] 张翰林，吕卫光，郑宪清，等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报，2015, 23(3): 302–308
Zhang H L, Lü W G, Zheng X Q, et al. Effects of years of straw return to soil on greenhouse gas emission in rice/wheat rotation systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 302–308

[4] Vergé X P C, De Kimpe C, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142(2/4): 255–269

[5] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity — Results from a short-term pilot field study[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(1/2): 309–313

[6] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green[J]. Nature, 2006, 442(7103): 624–626

[7] 高德才，张蕾，刘强，等. 生物黑炭对旱地土壤 CO_2、CH_4、N_2O 排放及其环境效益的影响[J]. 生态学报，2015, 35(11): 3615–3624
Gao D C, Zhang L, Liu Q, et al. Effects of biochar on CO_2, CH_4, N_2O emission and its environmental benefits in dryland soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3615–3624

[8] Stewart C E, Zheng J Y, Botte J, et al. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2013, 5(2): 153–164

[9] 柯跃进，胡学玉，易卿，等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO_2 释放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 93–99
Ke Y J, Hu X Y, Yi Q, et al. Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO_2 release in arable soil[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 93–99

[10] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, et al. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil[J]. Chemosphere, 2009, 77(4): 574–581

[11] 郭艳亮，王丹丹，郑纪勇，等. 生物炭添加对半干旱地区

土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3393–3400
Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, et al. Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region[J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3393–3400

[12] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. Plant and Soil, 2011, 351(1/2): 263–275

[13] 宋敏, 齐鹏, 蔡立群, 等. 不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1185–1195
Song M, Qi P, Cai L Q, et al. Effect of different biochar application levels on greenhouse gas emissions in the Loess Plateau semi-arid environment in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(9): 1185–1195

[14] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 879–888
Tian S Z, Ning T Y, Chi S Y, et al. Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 879–888

[15] 叶勇, 卢昌义, 林鹏, 等. 河口红树林湿地 CH_4 通量的日变化研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(3): 103–109
Ye Y, Lu C Y, Lin P, et al. Diurnal change of CH_4 fluxes from esturine mangrove wetlands[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(3): 103–109.

[16] 刘博, 黄高宝, 高亚琴, 等. 免耕对旱地春小麦成熟期 CO_2 和 N_2O 排放日变化的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(1): 82−87
Liu B, Huang G B, Gao Y Q, et al. Effects of no-tillage on daily dynamics of CO_2 and N_2O emission from spring wheat field during mature stage[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(1): 82−87

[17] 蔡立群, 王娟, 罗珠珠, 等. 不同耕作条件下豆麦双序列轮作农田土壤温室气体的排放及影响因素研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 921–930
Cai L Q, Wang J, Luo Z Z, et al. Greenhouse gas emissions in double sequence pea-wheat rotation fields under different tillage conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 921–930

[18] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844–4853
Zhang B, Liu X Y, Pan G X, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(23): 4844–4853

[19] Lukas V Z, Singh B, Foseph S, et al. Biochar and emissions of non-CO_2 greenhouse gases from soil[M]//Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. London: Earthscan, 2009: 232

[20] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 46: 80–88

[21] 王欣欣, 邹平, 符建荣, 等. 不同竹炭施用量对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 198–204
Wang X X, Zou P, Fu J R, et al. Effects of bamboo biochar amendments on methane and nitrous oxide emission from paddy soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(1): 198–204

[22] 段翠清, 张仁陟, 蔡立群, 等. 保护性耕作对黄土高原旱地春小麦成熟期农田温室气体通量日变化的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(21): 35–40
Duan C Q, Zhang R Z, Cai L Q, et al. Effects of conservation tillage on daily dynamics of greenhouse gases flux from spring wheat during mature stage in dry land of the Loess Plateau[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(21): 35–40

[23] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH_4、N_2O 气体排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3655–3661
Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, et al. Emission characteristics of CH_4 and N_2O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(11): 3655–3661

[24] 张广斌, 马静, 马二登, 等. 尿素施用对稻田土壤甲烷产生、氧化及排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2): 178–183
Zhang G B, Ma J, Ma E D, et al. Effects of urea application on methane production, oxidation and emission from a paddy soil[J]. Soils, 2010, 42(2): 178–183

[25] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792–800
Zhu Y G, Wang X H, Yang X R, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 792–800

[26] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(6): 1169–1179

[27] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2166–2172
Liu Y X, Wang Y F, Lü H H, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2166–2172

[28] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 930–939

[29] Lehmann J. Capturing relevant biochar properties: Current status and advances at the Kyoto meeting[C]//Biochar and New Green Agriculture of China: An International Workshop on Production and Application of Biochar in China's Agriculture. Nanjing, China: Cornell University, 2011

[30] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2005, 26(1): 7–10
Xie J F, Li Y E. Effect of soil temperature on N_2O emission in upland farm of Beijing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(1): 7–10